

GeO₂-Sb₂O₃-K₂O 玻璃空芯光纤 材料的光学特性研究

侯蓝田

(吉林大学物理系, 长春 130023)

孙英志

赵 斌

(长春邮电学院光通信系, 长春 130012) (香港科技大学物理系)

摘 要 系统地研究了传输 CO₂ 激光用的新型光纤材料 GeO₂-Sb₂O₃-K₂O 玻璃空芯光纤的光学特性。通过理论计算, 得到了该材料 $n_r < 1$ 的波长范围, 消光系数 K 和损耗系数 α , 通过工艺和材料的选择, 使 α 理论值达到 0.05 dB/m。同时讨论了 HE₁₁, TM₀₁, TE₀₁ 模式损耗和频率的关系。

关键词 GeO₂-Sb₂O₃-K₂O 玻璃, 光学常数, 损耗系数, 模式。

1 引 言

当人们发现有些氧化物玻璃在 10.6 μm 处具有复折射指数的实部 $n_r < 1$ 的特点后, 并用它制造传输 CO₂ 激光用的空芯光纤。英国 ERA 技术公司的 Worrell 等人制造的 GeO₂ 基掺杂 PbO 玻璃光纤的预计损耗为 0.5 dB/m^[1, 2], 美国 Rutgers 大学的 Saggese 等人研究的兰宝石和 Al₂O₃ 陶瓷材料制成的空芯光纤^[2], 预计损耗为 0.15 dB/m^[3], 日本东北大学的 Baha 博士研究的 SiO₂+TiO₂ 玻璃空芯光纤的预计损耗为 0.07 dB/m, 这些结果都达到了较高的水平, 有的已经进入了实用化研究阶段。目前研究具有 $n_r < 1$ 的空芯光纤已经成为研究传输 CO₂ 激光的主要内容。本文报道的掺 Sb₂O₃ 的锗基玻璃光纤材料, 显示出了很好的应用前景。

2 材料的选择及样品制备

选择 GeO₂ 为基质材料, 分别掺杂 10 mol%, 20 mol%, 30 mol% 的 Sb₂O₃, 并加入相当于 10 mol% K₂O 的 K₂CO₃ 配料放入玛瑙研钵中研磨, 使之均匀, 放入氧化铝坩埚中, 经 1000~1200 °C 烧结保温 6~8 h 后, 缓慢退火 8~12 h, 即形式较好的玻璃态。GeO₂ 四面体网络的振动光谱中, 在 893 cm⁻¹ 处有一个强吸收带, 它的 $n_r < 1$ 的区域很接近于 CO₂ 激光的 940 cm⁻¹。掺杂以后, 使 GeO₂ 能形成稳定玻璃态, 并且具有良好的工艺性能。

3 红外反射光谱的测定

为了计算 n_r 、 K 和寻找 $n_r < 1$ 的区域,用 FGS-3240 型红外光谱仪对三种样品进行了红外反射光谱的测量。

为了避免在抛光样品时造成污染,直接从坩锅中取样,使样品具有原始光滑表面,以保证测试结果的真实性。测量结果见表 1 如图 1。

Table 1. The position of infrared reflective spectra of three samples

| No. | samples | position (cm ⁻¹) | transmitting (%) |
|-----|--|------------------------------|------------------|
| 1 | GeO ₂ 80% · Sb ₂ O ₃ 10% · K ₂ O 10% | 860 | 15.5 |
| 2 | GeO ₂ 70% · Sb ₂ O ₃ 20% · K ₂ O 10% | 859 | 23.8 |
| 3 | GeO ₂ 60% · Sb ₂ O ₃ 30% · K ₂ O 10% | 848 | 19.7 |

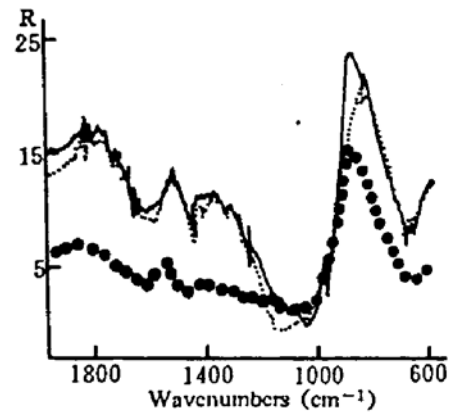


Fig. 1 Infrared reflection spectra of the samples
●●: sample 1, — sample 2, sample 3

4 理论分析与 n_r 、 K 值的计算

由于在半导体和电介质中,总存在着复折射指数的实部 $n_r < 1$ 的区域,即有

$$n_r(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\omega_i K(\omega_i)}{\omega_i^2 - \omega^2} d\omega_i \quad (1)$$

其中 K 可由 $\gamma = \frac{2\omega}{c}K$ 求得, γ 为材料的吸收系数, ω_0 为中心吸收频率, c 为光速,当 $\omega > \omega_0$ 时,存在着 $n_r < 1$ 的区域,该区域的范围大约为 100 cm⁻¹ 左右。

为了求出材料的 n_r 、 K 值,本文采用测量样品的红外反射光谱 $R(\lambda)$,再应用克喇末-克朗尼格(K-K)色散关系进行计算。当辐射从空气正入射到样品表面时,反射率 $R = [(n - 1)^2 + K^2] / [(n + 1)^2 + K^2]$,引入复反射率 ρ , $\rho = r \exp(i\varphi)$,其中 $r = \sqrt{R}$,可以导出:

$$n = (1 - r^2) / (1 + r^2 - 2r \cos \varphi) \quad (2)$$

$$K = -2r \sin \varphi / (1 + r^2 - 2r \cos \varphi) \quad (3)$$

$$\varphi(\omega) = \frac{2\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{\ln r(\omega_i)}{\omega_i^2 - \omega^2} d\omega_i \quad (4)$$

应用(3)~(5)式计算样品的 n_r 、 K 值,并画出曲线,如图 2(a),图 2(b),图 2(c)所示,将三个样品的 n_r 、 K 值列于表 2。

Table 2. Theoretically calculated n_r and K values of samples

| No. | position of the minimum of n_r (cm ⁻¹) | mimum vaule of n_r (cm ⁻¹) | value of n_r at 940 cm ⁻¹ | value of K at 940 cm ⁻¹ | position of the peak value of K (cm ⁻¹) |
|-----|--|--|--|--------------------------------------|---|
| 1 | 841 | 0.87 | 1.11 | 0.38 | 737 |
| 2 | 907 | 0.44 | 0.55 | 0.82 | 779 |
| 3 | 1025 | 0.82 | 0.98 | 0.35 | 905 |

从表 2 可见,GeO₂ 中掺杂不同摩尔百分比的 Sb₂O₃ 后, $n_r < 1$ 的范围不同,在 940⁻¹ 处的 n_r 值也不同;其中 2[#] 样品的 n_r (10.6 μm) 值最小,为 0.55。与 n_r 相联系的 K 值在 940 cm⁻¹ 处的值也不同,2[#] 样品的 K 值为 0.82,与其它两个样品的 K 值相比较,相对较大。这些结果说明,

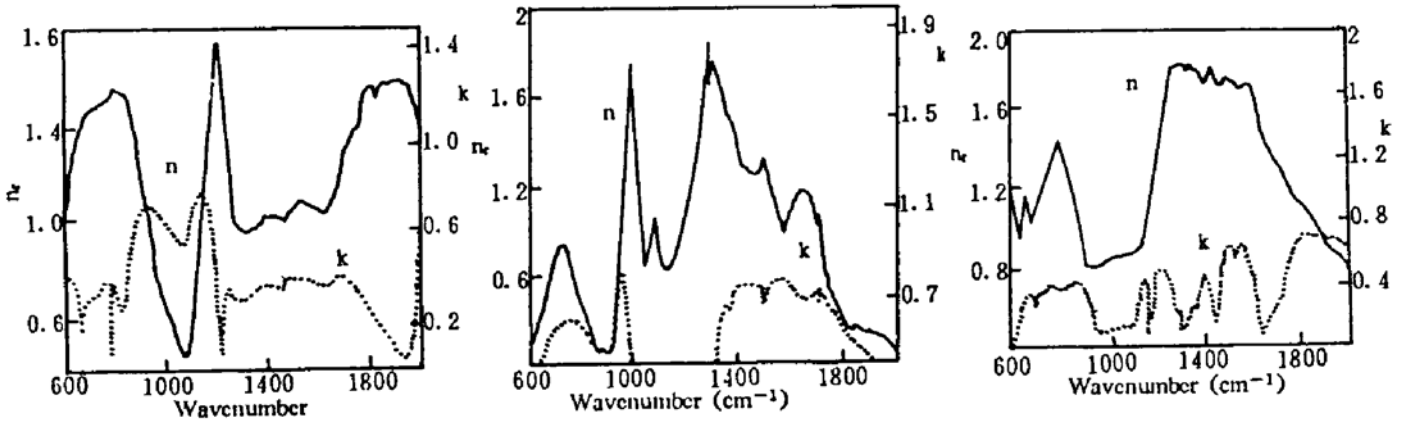


Fig. 2 Values of n and K of the samples varying with frequency

掺杂重金属离子可以移动 $n_r < 1$ 的位置, 但同时要考虑 K 值的大小。如果选用这种材料制成光纤, 必须计算它的传输损耗 α 的大小, 而 α 值又与 n_r 和 K 值有关系, 下面讨论这种材料的理论损耗值。

5 空芯波导理论损耗的计算

在空芯圆柱波导中, 光场的模式由麦克斯韦(Maxwell)方程的解给出(在柱坐标下)

$$E_{nm}(r, \theta, z) = E_{nm}(r \cdot \theta) \exp [(1 - \alpha_{nm} + i\beta_{nm})Z - \omega t]$$

$$|n|, m = 0, 1, 2, 3 \dots\dots$$

式中 E 为波导中电场或磁场分量, α_{nm} 和 β_{nm} 是在 Z 方向 E_{nm} 模的损耗和位相常数。 α_{nm} 可写成^[5]

$$\alpha_{nm} = (U_{nm}/2\pi)^2 \lambda^2 / T^3 \begin{cases} \text{Re}(Z_{TE}) & \text{对 TE}_{0m} \text{ 模} \\ \text{Re}(Y_{TM}) & \text{对 TM}_{0m} \text{ 模} \\ \text{Re}(Z_{TE} + Y_{TM})/2 & \text{对 HE}_{nm} \text{ 模} \end{cases}$$

式中 $Z_{TE} = (\gamma^2 - 1)^{-1/2}$, $Y_{TM} = \gamma^2(\gamma^2 - 1)^{-1/2}$, γ 为壁材料的复折射率, λ 为光在真空中的波长。利用边界条件:

$$r = a \text{ 时, } \mathbf{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = 0, \quad \mathbf{n} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0.$$

切线方向连续, $r = a$, $E_{1\theta} = E_{2\theta}$, $H_{1\theta} = H_{2\theta}$, 其中 $E_{1\theta}$ 为光纤芯(空气)的 θ 方向电场分量。 $E_{2\theta}$ 为光纤包层($n_r < 1$)的 θ 方向电场分量。同理 $H_{1\theta}$, $H_{2\theta}$ 为磁场分量; 除了 θ 方向, Z 方向也是连续的, 即有 $E_{1z} = E_{2z}$, $H_{1z} = H_{2z}$ 。则 U_{nm} 可以从下列贝塞尔方程求得:

$$J_1(U_{nm}) = 0, \quad (n = 0 \text{ 对 TE}_{0m} \text{ 和 TM}_{0m} \text{ 模})$$

$$J_{n+1}(U_{nm}) = 0 \quad (n \neq 0 \text{ 对 EH}_{nm} \text{ 和 HE}_{nm} \text{ 模})$$

表 3 给出 U_{nm} 的几个典型值^[4]。

Table 3. Values of U_{nm} derived from besel equation

| $n \backslash m$ | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|-------|-------|--------|--------|
| 1 | 2.05 | 5.520 | 8.645 | 11.796 |
| 2 or 0 | 3.832 | 7.016 | 10.173 | 13.324 |
| 3 or -1 | 5.136 | 8.417 | 11.620 | 14.796 |
| 4 or -2 | 6.380 | 9.761 | 13.015 | 16.223 |

参考表 3, 假设光纤的直径 $a_0 = 1.0 \text{ mm}$ 时, 计算了 TE_{01} , TM_{01} , HE_{11} 模式的损耗, 见表

4 所列。

Table 4. The loss at three modes

| modes | TM ₀₁ | | | TE ₀₁ | | | HE ₁₁ | | | |
|---|------------------|------|------|------------------|------|------|------------------|------|------|---|
| | No. | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| loss at 940 cm ⁻¹ (dB/m) | 0.34 | 0.51 | 0.45 | 0.06 | 0.06 | 0.09 | 0.14 | 0.05 | 0.10 | |
| minimum loss (dB/m) | 0.07 | 0.10 | 0.09 | 0.03 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | |
| position of minimum loss (cm ⁻¹) | 1042 | 909 | 850 | 1042 | 909 | 850 | 1042 | 909 | 850 | |

从表 4 可见，比较三种模式的数据，2# 样品的理论损耗值最小，画出 2# 样品的损耗谱图如图 3 所示。从图中可见，直波导时，HE₁₁ 模的损耗随频率变化的曲线表现出最小值；TM₀₁ 模式损耗最大。它们的最小区域都在 890~950 cm⁻¹ 之间，这正是本文作者所希望的。

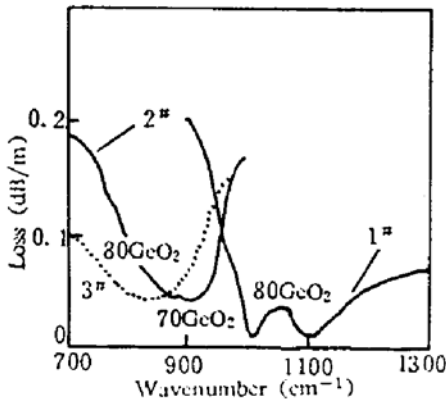


Fig. 3 The loss spectra of different modes of sample 2

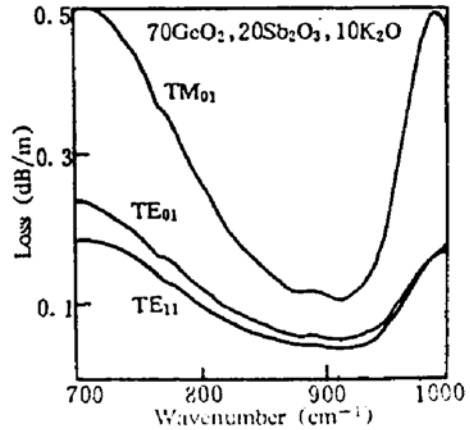


Fig. 4 Loss spectra of HE₁₁ mode of the sample 1, 2, 3

为了比较 HE₁₁ 模式在不同掺杂量样品中的损耗，又画出图 4，从图中看出，随着 Sb₂O₃ 掺杂量的增加，HE₁₁ 模式的损耗值向长波移动，分别为 1000 cm⁻¹，910 cm⁻¹，830 cm⁻¹，以掺杂 20 mol% Sb₂O₃ 的 2# 样品在 940 cm⁻¹ 处的理论值为 0.05 dB/m，这已经小于目前报道的 Al₂O₃ 和 TiO₂+SiO₂ 的损耗值。

光纤的损耗值与材料的 n_r、K 值有密切关系，为说明这一点又计算并画出了 2# 样品的模式损耗与 n_r、K 的关系曲线。(如图 5 所示)

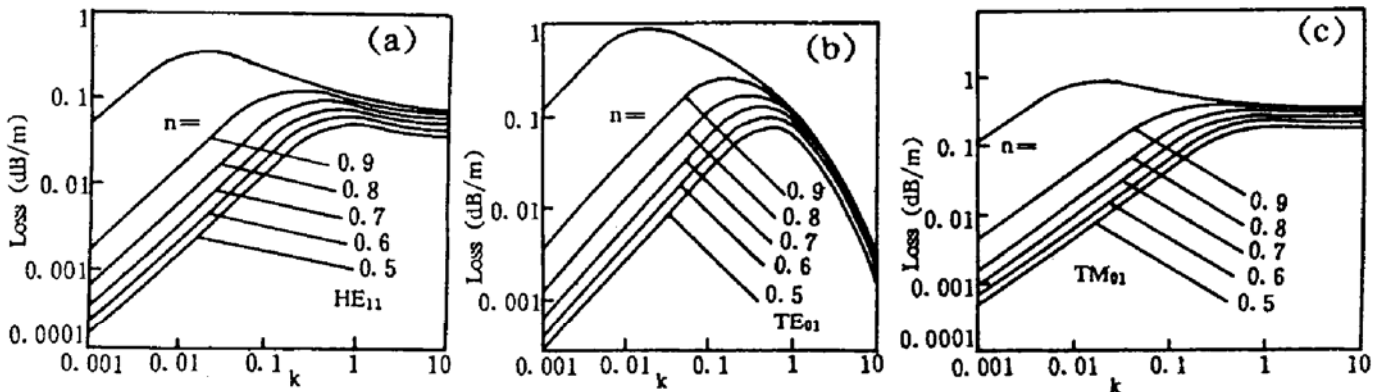


Fig. 5 Loss spectra of different modes vary with n_r, K

从图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)的三组曲线看出，损耗值总是随着 n_r 的减小而减小，当 K

值小于 1 时, 损耗随着 K 值的减小而急速下降, 当 K 值大于 1 时, HE_{11} 模和 TM_{01} 模式损耗趋于平稳, 只有 TE_{01} 模式图 5(b) 的一组曲线在 K 为 0~1 之间出现损耗峰值。

5 结果和讨论

1) 在 GeO_2 中掺杂 20 mol% 浓度的 Sb_2O_3 制成的 GeO_2 基玻璃是制造传输 $10.6 \mu\text{m}$ CO_2 激光光纤的良好材料, 它的理论损耗达到 0.05 dB/m , 优于目前报道的其它材料。

2) 制造光纤材料时, 在尽可能减小 n_r 值的情况下, 降低 K 值, 即在通过调正 Sb_2O_3 和 K_2O 的组份来移动 $n_r < 1$ 的区域时, 要同时考虑 n_r 和 K 值的变化, 尤其要注意原料的纯度, 消除在 $10.6 \mu\text{m}$ 处的吸收以减小 K 值。

向帮助过我们的吕平讲师, 傅连符工程师, 韩玉华副教授致以谢意。

参 考 文 献

- [1] C. A. Worrell, V. Skarada., CO_2 laser waveguides from germanium-based glasses. *J. Appl. Phys. D.*, 1989, **22** (3): 535~541
- [2] C. A. Worrell, Infrared optical properties of glasses and ceramics for Hollow waveguides operating at $10.6 \mu\text{m}$ wavelength. *Proc. SPIE*, 1987, **843**: 80~86
- [3] S. J. Sagges, J. Harrington, G. H. Sigel., Hollow sapphire waveguides from remote radiometric temperature measurements. *J. Electron. Lett.*, 1991, **27**: 707~709
- [4] E. A. J. Marcatili, R. A. Schmelzter, Hollow metallic and dielectric waveguides for distance optical transmission and laser. *Bell. Syst. Tech. J.*, 1964, (43): 1783

Optical Properties of $\text{GeO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ Hollow-Core Optical Fiber Material

Hou Lantian

(Department of Physics, Jilin University, Changchun 130023)

Sun Yingzhi

(Department of Light Communication, Changchun Post and Telecommunication Institute, Changchun 130012)

Zhao Bin

(Department of Physics, Hongkong University of Science and Technology)

(Received 18 October 1994; revised 5 December 1994)

Abstract This paper systematically studies the $\text{GeO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ glass hollow-core fiber material used for transmitting CO_2 laser. By theoretical calculation, the wave-length range and K value at $n_r < 1$, as well as loss coefficient, $\alpha = 0.05 \text{ dB/m}$ have been obtained. The relationship between loss and frequency at HE_{11} , TM_{01} and TE_{01} modes has been discussed.

Key words $\text{GeO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ glass, optical constant, loss coefficient, mode.